

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ 6060 И 6061

Бобрук Е.В.

Руководитель – к.т.н. Мурашкин М.Ю.

Институт физики перспективных материалов, Уфимский государственный
авиационный технический университет, г. Уфа

e-bobruk@yandex.ru

В данной работе представлены результаты исследования особенностей УМЗ структуры, сформированной в алюминиевых сплавах 6061 конструкционного назначения и 6060 для электротехнических изделий системы Al-Mg-Si в процессе интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) и закономерности изменения их статической и циклической прочности, а также электрических свойств.

Развитие современной техники требует создания новых сплавов или улучшения существующих. В этой связи к алюминиевым сплавам, широко используемых в авиации, автомобилестроении, строительстве и энергетике, предъявляются все возрастающие требования в отношении их физико-механических свойств [1].

В последние годы большой интерес проявляется к достижению высокого уровня свойств в алюминиевых сплавах за счет формирования в них ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры используя методы интенсивной пластической деформации (ИПД) [2]. Ранее было показано, что УМЗ сплавы обладают в 1.3...2 раза большей прочностью по сравнению с их крупнозернистыми (КЗ) аналогами после стандартной упрочняющей обработки [3]. В ряде исследований также было установлено, что УМЗ сплавы могут демонстрировать улучшение таких характеристик, как пластичность, трещиностойкость и сопротивление усталости [4].

В результате обработки ИПДК при комнатной температуре исходная крупнозернистая структура сплавов 6061 и 6060 трансформируется в однородную УМЗ структуру со средним размером зерна 170 и 190 нм, соответственно, имеющих форму близкую к равноосной.

Повышение температуры обработки ИПДК до 180°C привело к формированию в заготовках сплава 6060 УМЗ структура со средним размером зерна 350 нм. Электронно-микроскопические исследования также позволили установить, что после такой обработки в УМЗ сплаве образуются дисперсные выделения вторичной упрочняющей фазы Mg_2Si размером 10...20 нм, т.е. формирование УМЗ структуры в процессе ИПД при повышенной температуре сопровождалось процессом распада твердого раствора – динамическим деформационным старением (ДДС) [5].

РСА показал, что максимальные значения среднеквадратичной микродеформации ($\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$) были получены в сплавах после обработки ИПДК при КТ. При повышении температуры ИПДК до 180°C значение $\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$ уменьшается более чем в 5 раз, приближаясь к значению, определенному для исходного состояния материалов (таблица 1).

Таблица 1 - Данные рентгеноструктурного анализа

Материал	Обработка	Состояние	$\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$, %	a , Å
Сплав 6061	Закалка	КЗ	0.010 ± 0.009	4.0542 ± 0.0001
	ИПД при КТ	УМЗ	0.210 ± 0.020	4.0516 ± 0.0002
Сплав 6060	Закалка	КЗ	0.010 ± 0.009	4.0511 ± 0.0001
	T6	КЗ	-	4.0509 ± 0.0001
	ИПД при КТ	УМЗ	0.170 ± 0.030	4.0506 ± 0.0001
	ИПД при 180°C	УМЗ	0.030 ± 0.010	4.0498 ± 0.0001

Судя по уменьшению a сплава 6060 после ИПДК, выполненной при повышенной температуре, можно сделать вывод, о том, что концентрация легирующих элементов в УМЗ матрице снижается на порядок, максимально приближаясь к чистому алюминию. Такое снижение концентрации в материале вызвано образованием в ходе ИПД наноразмерных частиц вторичной фазы Mg_2Si .

Анализ механических характеристик (таблица 2) и величины удельной электрической проводимости (ω), позволил установить, что обработка ИПДК при повышенной температуре может обеспечить формирование УМЗ состояния позволяющего достигнуть в сплаве 6060 сочетания высокой прочности и электропроводности. Временное сопротивление УМЗ сплава на 40 % выше, чем после стандартной обработки T6, а ω и IACS увеличиваются с 31.1 до 33.7 МСм/м и с 53.6 до 58.1 %, соответственно, приближаясь к значениям чистого алюминия.

Таблица 2 - Механические свойства сплавов системы Al-Mg-Si

Материал	Обработка	Состояние	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Сплав 6061	T6	КЗ	276 ± 14	365 ± 16	14.0 ± 1.0
	ИПД при КТ	УМЗ	605 ± 21	675 ± 28	5.5 ± 0.3
Сплав 6060	T6	КЗ	206 ± 12	250 ± 20	8.0 ± 0.4
	ИПД при КТ	УМЗ	426 ± 8	525 ± 12	5.0 ± 0.4
	ИПД при 180°C	УМЗ	263 ± 10	347 ± 8	7.0 ± 0.3

Увеличение прочности на 40 % УМЗ сплава 6060, полученного ИПДК при 180°C, обеспечивается малым размером зерна согласно соотношению Холла-Петча. Одновременно с упрочнением выделение частиц фазы Mg_2Si приводит к обеднению алюминиевой матрицы основными легирующими элементами (Mg и Si), что позволяет увеличить электрическую проводимость

материала, так как именно концентрация легирующих элементов в сплавах оказывает определяющее влияние на рассеяние электронов проводимости.

Анализ кривых усталости исследованных серий образцов сплава 6061 с КЗ структурой после стандартной упрочняющей обработки (Т6) и с УМЗ структурой, сформированной в результате ИПДК при КТ показал, что в УМЗ состоянии сплав 6061 обладает в 2 раза большим пределом выносливости ($\sigma_{-1} = 200$ МПа), чем сплав с КЗ структурой подвергнутый стандартной обработке Т6 ($\sigma_{-1} = 100$ МПа).

Анализ особенностей рельефа поверхности усталостного разрушения образцов в состоянии Т6 показал, что разрушение начинается с поверхности образца и область зарождения трещины в глубь материала составляет ~ 150 мкм. На стадии стабильного роста трещины наблюдается вязкий гребенчатый характер разрушения. Статический долом связан с типичным вязким ямочным характером разрушения. Рельеф поверхности разрушения с УМЗ структурой менее развит по сравнению с образцами КЗ материала в состоянии Т6. На стадии стабильного распространения усталостной трещины наблюдается межзеренное разрушение. На стадии ускоренного роста усталостной трещины ближе к зоне статического долома наблюдается вязкий гребенчатый рельеф. Статический долом, как и в случае КЗ образцов – вязкий ямочный.

Работа была выполнена при поддержке проекта РФФИ №14-08-31301\14 мол_а.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Light Alloys. From Traditional alloys to Nanocrystals. Ed. by I.J. Polmer Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, Oxford, UK (2006) p.417;
2. Valiev R.Z., Estrin Y., Horita Z., Langdon T.G., Zehetbauer M.J., Zhu Y.T. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation // JOM, (2006) 58, №4, pp. 33-38;
3. Sabirov I., Murashkin M.Yu., Valiev R.Z. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development Mater. Sci. Eng A560 (2013) pp. 1-24;
4. Y. Estrin, A. Vinogradov Fatigue behaviour of light alloys with ultrafine grain structure produced by severe plastic deformation: An overview // Int. J. Fatigue (2010) 32, pp. 898-907;
5. Nurislamova G., Sauvage X., Murashkin M., Islamgaliev R. Nanostructure and related mechanical properties of Al 6061 alloy processed by severe plastic deformation // Phil. Mag. Letters (2008) № 88, 6, pp. 459-466.